Inż. Jan Szowhenow

Przyczynek do ustalenia katastrofalnych przepływów oraz odpowiednich poziomów zwierciadła wody w potokach.

W artykule „O racjonalnym profilu wałów ochronnych" [1]) poruszyłem już kwestję ustalenia katastrofalnych przepływów oraz zw. w. wody między wałami. Obecnie chcę zastanowić się nad tymi zagadnieniami nieco dłużej i omówić: sposób wyznaczania katastrofalnych przepływów metodami matematycznej statystyki, zagadnienie spółczynników szorstkości n we wzorach Ganguillet'a - Kutter'a i Manninga oraz sposób, ułatwiający żmudne obliczenia rzędnych poziomów wód w korycie naturalnym tak nieobwałowanym, jak też obwałowanym.

Ustalenie katastrofalnego przepływu.

Najlepszy sposób ustalania katastrofalnych przepływów — bezpośredni jego pomiar w czasie najwyższego stanu wód, praktycznie rzadko jest możliwy. Najczęściej wypada obliczyć, czy wykreślić krzywą konsumcyjną dla okresu z pewnej, zwykle niewielkiej, ilości lat, poza którym ekstrapolacja krzywej nastręcza duże trudności, często zaś jest wprost niemożliwa. Wymiary koryta lub objektów hydrotechnicznych winny być tak zaprojektowane, by wystarczyły dla przejścia objętości, które mogą przewyższyć najwyższe ze spostrzeżonych lub być mniejszymi od najmniejszych za ubiegły okres czasu.

Dla ustalenia przepływów wysokich wód o różnej częstotliwości pojawiania się wraz z wyższymi można korzystać z metody matematycznej statystyki, zastosowanej ostatnio do zjawisk hydrologicznych przeważnie przez hydrologów amerykańskich, zwłaszcza przez Allen Hazen'a i Foster'a. Powyższa metoda, w zastosowaniu do maksymalnych rocznych przepływów, polega na następującem: największe roczne przepływy, wyznaczone dla szeregu n lat na podstawie spostrzeżonych stanów wody oraz krzywej konsumcyjnej, należy uszeregować w odpowiedniej tabeli od największego ze znanych do najmniejszego. Następnie należy obliczyć: średnią arytmetyczną wartość Q_c ze wszystkich n zmiennych przepływów, stosunek K każdego przepływu Q do średniego Q_c, wartości $(K-1)$, $(K-1)^2$: $(K-1)^3$. Po otrzymaniu powyższych danych obliczamy pewne wartości charakteryzujące nasz szereg statystyczny, a mianowicie: [2]) [3]) [4]).

odchylenie średnie $$\sigma = +\sqrt{\frac{\Sigma_1^n (Q_i - Q_c)^2}{n-1}} \quad (1)$$

współczynnik zmienności $$C_v = +\sqrt{\frac{\Sigma_1^n (K_i - 1)^2}{n-1}} \quad (2)$$

współczynnik asymetrji $$C_s = \sum_1^n \frac{(K_i - 1)^3}{(n-1)\, C_v^3} \quad (3)$$

Wartości Q_c, σ, C_v i C_s zależą od ilości n szeregu lat, użytych dla obliczeń. Badania nad tą zależnością wykazały, że ze zwiększeniem ilości lat spostrzeżeń wartość Q_c zmienia się, przyczem rzeczywista wartość Q_s może odchylić się od Q_c najwyżej o $\pm 4 \times 0{,}674 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, t. j. wahać się może w granicach:

$$Q_s = Q_c + 4 \times 0{,}674 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

$$Q_s = Q_c - 4 \times 0{,}674 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Tak samo współczynnik C_v ze zwiększeniem ilości lat może ulec zmianie, przyczem wartość współczynnika waha się w granicach:

$$C_v' = C_v + 4 \times 0{,}674 \frac{C_v}{\sqrt{2n}} \sqrt{1+2C_v^2} \quad (6)$$

$$C_v'' = C_v - 4 \times 0{,}674 \frac{C_v}{\sqrt{2n}} \sqrt{1+2C_v^2} \quad (7)$$

Wartość C_v daje się wyznaczyć dość dobrze na podstawie dziesiątków spostrzeżeń; natomiast, w przybliżeniu stałą wartość C_s można otrzymać tylko, znając setki spostrzeżeń, czego zazwyczaj nie posiadamy. Wobec tego ustalamy tylko graniczne wartości C_s korzystając ze wzoru:

$$\frac{2\,C_v}{1 - \dfrac{Q_{\min} \text{ ze spostrzeżonych}}{Q_c}} \geqslant C_s \geqslant 2C_v \quad (8)$$

przyczem dla zjawisk hydrologicznych przyjmują często

$$C_s = 2C_v$$

Po ustaleniu parametrów C_v i C_s, wyznaczamy, korzystając z tablicy Fostera [5]) najpierw dla $C_v = 1$ i przyjętego C_s odchylenia od średniej rzędnej krzywej czasów trwania $\Phi = \frac{K-1}{C_v}$, następnie mnożymy otrzymane wartości przez C_v i przechodzimy do właściwych rzędnych krzywej przez dodanie + 1., t. j. otrzymujemy $K = \Phi\, C_v + 1$ Krzywą czasów trwania budują zwykle na specjalnej siatce, której odcięte posiadają skalę prawdopodobieństwa [6]), rzędne zaś skalę normalną lub logarytmiczną.

[1]) Gospodarka wodna 1935 r. Str. 108—163.

[2]) Prof. Rybczyński, prof. Pomianowski i doc. Wóycicki. Hydrologja cz. I str. 221—239.

[3]) S. Krickij i M. Menkel. Rasczety rieczno-go stoka 1934 str. 46—86.

[4]) Sokołowskij. Primienienije kriwych raspredienzasta kustanowleniju wierojatnych kolebanij stoka riek Ewreilij Sojuzc.a 1933.

[5]) Hydrologja loc. cit. str. 232. Krickij str. 62 i 63

[6]) Hydrologja loco cit. 229.

Zbudowaną w powyższy sposób krzywą należy porównać z punktami, odpowiadającymi prawdopodobieństwu pojawienia się w okresie n lat każdego z przepływów wraz wyższymi, które to prawdopodobieństwo obliczamy wzorem:

$$p\,\% = 100\,\frac{2m-1}{2n} \qquad (10)$$

gdzie m — jest liczba porządkowa przepływu, dla którego wraz z wyższymi wyznaczamy stopień prawdopodobieństwa pojawiania się w okresie n lat.

Należy jednak pamiętać, że przy innej liczbie lat, np. n_1, dowolny przepływ Q będzie miał już nieco inny stopień prawdopodobieństwa pojawiania się wraz z wyższymi, niż w okresie n lat, wobec tego wzór (10) należy uważać tylko jako przybliżenie, wystarczające jednak dla celów praktyki.

W każdym razie odnalezione w powyższy sposób prawdopodobieństwa dla różnych stosunków $K = \frac{Q}{Q_c}$ dadzą możność otrzymać na siatce prawdopodobieństwa szereg punktów i po-

T A B E L A I.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
L. p.	Rok / mies.	Maxima roczne cm.	Maxima uszeregowane	Objętość przepływu m³/s	K = Q/Q ś	K — 1	(K — 1)²	% prawdop.
1	1881.III	407	561	6070	1,80	0,80	0,640	0,92
2	2.VIII	397	558	5970	1,77	0,77	0,593	2,77
3	3.VI	307	548	5690	1,69	0,69	0,476	4,63
4	4.VI	546	546	5630	1,68	0,68	0,449	
5	5 VII	390	546	5630	1,68	0,68	0,449	8,33
6	6.IV	471	544	5575	1,66	0,66	0,436	10,26
7	7.VI	454	518	4895	1,45	0,45	0,203	
8	8 III	544	518	4895	1,45	0,45	0,203	13,89
9	9.III	546	502	4495	1,33	0,33	0,109	15,74
10	1890 I	363	486	4105	1,22	0,22	0,048	17,60
11	1.III	561	480	3965	1,18	0,18	0,032	
12	2.III	352	480	3965	1,18	0,18	0,032	21,30
13	3 III	469	478	3925	1,16	0,16	0,026	23,15
14	4.VI	478	475	3860	1,14	0,14	0,020	25,00
15	5.III	459	474	3835	1,14	0,14	0,020	26,85
16	6.III	346	473	3815	1,14	0,14	0,020	28,70
17	7.III	437	471	3775	1,11	0,11	0,012	30,56
18	8.IV	427	469	3735	1,11	0,11	0,012	
19	9.VII	450	469	3735	1,11	0,11	0,012	
20	1900.III	448	469	3735	1,11	0,11	0,012	36,11
21	1.VI	442	468	3710	1,10	0,10	0,010	37,96
22	2.VI	386	461	3575	1,06	0,06	0,004	39,81
23	3.VII	518	460	3550	1,05	0,05	0,002	41,66
24	4.II	235	459	3530	1,05	0,05	0,002	43,51
25	5.III	356	454	3440	1,02	0,02	0,000	45,36
26	6.VII	480	453	3425	1,02	0,02	0,000	47,21
27	7.IV	461	450	3375	1,00	0,00	0,000	49,06
28	8.VII	474	448	3330	0,99	— 0,01	0,000	50,92
29	9.V	518	447	3320	0,98	— 0,02	0,000	52,17
30	1910.VII	260	443	3240	0,96	— 0,04	0,002	54,62
31	1 II	416	442	3220	0,96	— 0,04	0,002	56,47
32	2.IV	460	440	3185	0,95	— 0,05	0,002	58,32
33	3.VIII	475	437	3130	0,93	— 0,07	0,005	60,17
34	4.IV	367	433	3065	0,91	— 0,09	0,008	62,02
35	5.IV	443	429	3000	0,89	— 0,11	0,012	63,87
36	6.IV	502	427	2963	0,88	— 0,12	0,014	65,72
37	7.III	469	416	2790	0,83	— 0,17	0,029	67,57
38	8.VII	409	409	2685	0,80	— 0.20	0,040	69,42
39	9.V	473	407	2660	0,79	— 0,21	0,044	71,27
40	1920.I	468	397	2515	0,75	— 0,25	0,062	73,12
41	1.III	310	390	2425	0,72	— 0,28	0,078	75,00
42	2.III	480	388	2400	0,71	— 0,29	0,084	76,85
43	3.II	453	386	2375	0,70	— 0,30	0,090	78,70
44	4.III	558	373	2225	0,66	— 0,34	0,116	80,55
45	5.VII	469	367	2185	0,65	— 0,35	0,122	82,40
46	6.X	429	363	2130	0,63	— 0,37	0,137	84,25
47	7.IX	433	356	2055	0,61	— 0,39	0,152	86,10
48	8.II	388	352	1995	0,59	— 0,41	0,168	87,95
49	9.III	440	346	1935	0,57	— 0,43	0,185	89,80
50	1930.XI	373	335	1835	0,54	— 0,46	0,212	91,65
51	1	486	310	1610	0,48	— 0,52	0,270	93,50
52	2	447	307	1590	0,47	— 0,53	0,281	95,35
33	3	335	260	1220	0,36	— 0,64	0,410	97,20
54	4.VII	548	235	1050	0,31	— 0,69	0,476	99,07
		Σ =	23613	Σ=182038			Σ=7,025	

równać z niemi przebieg krzywej F o s t e r'a. Wspomniane porównanie może dać powód do pewnej zmiany współczynników C_v lub C_s i nowego obliczenia rzędnych krzywej.

Ostatecznie ustalona krzywa F o s t e r'a pozwala wyznaczyć dla dowolnego stopnia prawdopodobieństwa stosunek $y = \frac{Q}{Q_c}$, skąd

$$Q = y\, Q_c \tag{11}$$

Q_c przyjmujemy zwykle, jako wartość średnią arytmetyczną z n obserwacyj. W tych jednak wypadkach, gdzie jest wskazana największa ostrożność, przyjmujemy zamiast Q_c — przepływ Q_s (wzór 4).

Powyższe ogólne wskazówki wyjaśnimy na przykładzie ustalenia wysokich przepływów na Wiśle pod Warszawą.

Materjał podstawowy dla tego celu stanowić będą dane z bezpośrednich pomiarów oraz obliczeń dokonanych przez Instytut Hydrograficzny za okres czasu 54 lat od r. 1881 do r. 1934 [7]).

Na podstawie tego materjału wyznaczono przepływ średni Q_c za okres 54 lat (3371 m/s), stosunki $K = \frac{Q}{Q_c}$, wartości $(K-1)$, $(K-1)^2$ oraz $^0/_0$ prawdopodobieństwa pojawiania się każdego przepływu wraz z wyższemi w okresie tych 54 lat.

Następnie obliczamy:

$$C_v = \sqrt{\frac{\Sigma (K_i - 1)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{7{,}025}{53}} = 0{,}36$$

$$\frac{2\,C_v}{1 - \frac{Q_{\min}}{Q_c}} > C_s > 2C_v$$

$$\frac{0{,}72}{1 - \frac{1050}{3371}} > C_s > 0{,}72$$

$$1{,}05 > C_s > 0{,}72$$

Wartość Q_s może wahać się w granicach

$$Q_s = 3371 \pm 4 \times 0{,}674\, \frac{0.36 \times 3371}{\sqrt{54}} = 3371 \pm 444,$$

Skąd $Q_s' = 3815$ m³/sek.; $Q_s'' = 2927$ m³/sek.

Współczynnik C_v może wahać się w granicach

$$C_v = C_v' \pm 4 \times 0{,}674\, \frac{C_v'}{\sqrt{2n}} \sqrt{1 + 2C_v'^2}$$

Skąd $C_v = 0{,}36 + 0{,}08$,

Na podstawie pewnych prób przyjmujemy $C_v = 0{,}40$ i $C_s = 0{,}80$.

Po ustaleniu współczynników C_v i C_s wybieramy z tabeli *F o s t e r'a* odpowiednie rzędne $\Phi = \frac{K-1}{C_v}$ dla danego C_s oraz dla $C_v = 1$, następnie obliczamy $K - 1 = \Phi . C_v$ oraz ostatecznie $K = \Phi\, C_v + 1$. Wyniki obliczeń dla Wisły zawiera Tabl. II.

Przyjmując otrzymaną krzywą za miarodajną, można obliczać przepływy wielkich wód o różnym stopniu prawdopodobieństwa. W tych wypadkach, gdzie koniecznym będzie przewidywanie (w pewnym okresie lat) największych, chociażby mało prawdopodobnych przepływów, należałoby przyjąć zwiększoną wartość średniego arytmetycznego przepływu Q_s', w danym wypadku $Q_s' = 3815$ m³/s. Przy takim Q_s największe przepływy Wisły pod Warszawą wynosiłyby: raz na 100 lat — 8240 m³/s, raz na 200 lat — 8930 m³/s, raz na 500 lat 9380 m³/s oraz na 1000 lat — 10300 m³/s. Według inż. Dębskiego [8]) przepływ Wisły pod Warszawą o prawdopodobieństwie 1⁰/₀ wypadnie 8460 m³/s. Dla mniejszych ⁰/₀⁰/₀ prawdopodobieństwa wykresy inż. Dębskiego odpowiedzi nie dają.

Największa możliwa wartość średniego stanu wysokich wód

$$H^{s'} = H_s + 4 \times 0{,}674\, \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = H_s + 26 = 437 + 26 = 463 \text{ cm.}$$

Odczyt na wodowskazie może wtedy osiągnąć raz na 1000 lat $H_{\max} = 463 \times 1{,}49 =$ około 690 cm

W 1844 r. (27. VII.) woda podnosiła się nad zerem wodowskazu w Warszawie do 655 cm, t. j. była tylko o 0,35 m niżej od możliwej maksymalnej.

Powyższa metoda F o s t e r'a, oparta na analizie krzywych P e a r s o n'a, nie jest jedyną możliwą. Istnieją jeszcze inne sposoby, śród których zasługuje na uwagę sposób C h a r l i e r'a, zastosowany w hydrologji przez inż. Miałkowskiego. (Stok ta faktory stoku. Ukraińska Akademija Nauk, Kijów 1936 r.).

W s p ó ł c z y n n i k s z o r s t k o ś c i.

Oprócz ustalenia dla pewnego odcinka rzeki wartości przepływu wielkich wód niezbędnem jest bardzo często obliczenie rzędnych odpowiedniego poziomu wód tak w rzece wolnej, jak też obwałowanej.

Przy obliczeniu rzędnych wysokich wód największe trudności sprawiają obszary zalewowe. Wszystkie wzory empiryczne dla wyznaczenia średnich chyżości tak ze współczynnikami szorstkości, jak też bez nich, zostały wyprowadzone na podstawie obserwacyj w korytach normalnych, głównych. Dopiero w latach ostatnich pojawiły się próby z jednej strony dostosowania wzorów bez współczynników szorstkości do terenów zalewowych, z drugiej zaś — wyznaczenia wspomnianych współczynników dla warunków przepływu wód przez tereny zalewowe.

Prof. dr. M a t a k i e w i c z w artykule

[7]) Opracowane w powyższy sposób materjały zostały mi podane przez p. inż. O. Fausta.

[8]) Inż. K a z i m i e r z D ę b s k i. Roczne maxima odpływu, pojawiające się raz na 25 lat i częściej w przecięciu wieloletnim. Warszawa 1935. str. 28.

TABELA II.

P %	0,1	1	3	5	10	20	25	30	40	50
Φ	4,25	2,90	2,12	1,83	1,34	0,78	0,60	0,42	0,12	— 0,13
Φ. Cv	1,70	1,16	0,85	0,73	0,54	0,31	0,24	0,17	0,05	— 0,05
$K = \Phi Cv + 1$	2,70	2,16	1,85	1,73	1,54	1,31	1,24	1,17	1,05	0,95
$Q_i = Q_s' K$ m³/s										
przy $Q_i = 3815$ m³/s	10300	8240	7058	6600	5875	4998	4730	4464	3967	3662
$Q_i = Q_s'' K$ m³/s										
przy $Q_s'' = 2927$ m³/s	7288	5942	—	—	—	—	—	—	—	2810
Q_i według wykresów inż. Dębskiego	?	8464	7360	6624	5888	4968	4600	4232	3864	3680

P %	60	70	75	80	90	95	97	99	99,9
Φ	— 0,37	— 0,60	— 0,73	— 0,86	— 1,16	— 1,38	— 1,49	— 1,74	— 2,03
Φ. Cv	— 0,15	— 0,24	— 0,29	— 0,34	— 0,46	— 0,55	— 0,58	— 0,70	— 0,81
$K = \Phi . Cv + 1$	0,85	0,76	0,71	0,66	0,54	0,45	0,42	0,30	0,19
$Q_i = Q_s' K$ m³/sek									
przy $Q_s' = 3815$ m³/s	3243	2899	2709	2518	2060	1717	1602	1144	725
$Q_i = Q_s'' K$ m³/s									
przy $Q_s'' = 2927$ m³/s	—	—	—	—	—	—	—	843	524
Q_i według wykresów inż. Dębskiego	3312	2944	2870	2576	2245	1914	1840	1546	?

„Przepływ przez obszary zalewowe rzek'[9]) podaje w tej sprawie następujące wskazówki: „Przepływ w obszarach zalewowych rzek odbywa się niekorzystniej, jak we właściwem łożysku, obejmującem małą, średnią i zwykłą wielką wodę, co się objawia zmniejszeniem prędkości w tych obszarach w porównaniu z prędkościami w łożysku właściwym przy tym samym spadku i tej samej głębokości. Zmniejszenie to jest różne, zależnie od stopnia nieregularności tych obszarów, maleje jednak ze wzrostem głębokości przykrycia wodą. Praktycznie, w zwykłych warunkach, można przyjąć dla przykrycia o głębokości $t = 0$ m, zmniejszenie (chyżości) 30%, dla przykrycia $t = 4$ m, zmniejszenie 0, a dla przypadków pośrednich należy interpolować według prostej[10]). W wypadkach wyjątkowych, gdy obszar zalewowy jest bardziej pofałdowany, posiada wybitniejszą wegetację, wreszcie przy przepływie przez mosty, zmniejszenie prędkości dochodzi do 50%".

Korzystając z powyższych wskazówek, należy średnie chyżości wyznaczać wzorami lub tablicami prof. M a t a k i e w i c z a oddzielnie dla właściwego koryta o średniej głębokości t_1, oddzielnie zaś dla obszarów zalewowych, o średnich głębokościach t_2 i t_3, przyczem chyżości, otrzymane dla ostatnich, należy odpowiednio zmniejszyć w zależności od głębokości t_2 i t_3. Powyższy sposób jest bardzo łatwy, zwłaszcza jeżeli przy wyznaczeniu średniej chyżości v korzystać będziemy z tablic lub wykresów prof. M a t a k i e w i c z a. Dla koryta głównego $v_1 = f(t_1)\,\varphi(i)$, przepływ zaś $Q_1 = f(t_1)\,\varphi(i) . F_1$ m³/s.; dla obszaru zalewowego $v_2 = f(t_2)\,\varphi(i) . \beta$, przepływ zaś $Q_2 = f(t_2)\,\beta . \varphi(i)\,F_2$ m³/s.

W ostatnich wzorach β jest współczynnik zmniejszenia chyżości na obszarze zalewowym w zależności od głębokości t_2 oraz od rodzaju łożyska; spadek i przyjmuje się jednakowy dla całego przekroju.

$$Q_{max} = Q_1 + Q_2 = f(t_1)\,\varphi(i)\,F_1 + f(t_2)\,\beta\,\varphi(i)\,F_2, \text{ skąd}$$

$$\varphi(i) = \frac{Q_{max}}{f(t_1)\,F_1 + \beta f(t_2)\,F_2} \qquad (12)$$

Po otrzymaniu wartości $\varphi(i)$ znajdujemy z tablicy lub z wykresu spadek i dla badanego przekroju i dokonujemy dalszych obliczeń.

Powyższy sposób jest chyba najłatwiejszy, jeśli chodzi o matematyczne działania.

Metoda powyższa, oparta na stosunkowo małej jeszcze ilości materjału obserwacyjnego wymaga oczywiście dalszych sprawdzań. Pozatem wybór współczynnika β nastręcza niekiedy poważne trudności. Wobec powyższego zwykłe sposoby. oparte na wzorach G a n g u i l l e t - K u t t e r'a

[9]) Księga pamiątkowa ku uczczeniu zasług profesora Maksymiljana Thulliego. Lwów 1932.

[10]) Jeżeli np. głębokość wody na obszarze zalewowym $t = 2,50$ m, spadek $i = 0,5‰$ wtedy średnia chyżość w $\Lambda = 616 \times (1 - \frac{0,30}{4} \times 1,50) = 1,616 \times 0,89 = 1,44$ m/s.

TABL. III

wartości współczynników szorstkości n dla wzorów Ganguillet - Kutter'a i Manninga.

Rodzaj łożyska	Stan powierzchni łożyska bardzo dobry	dobry	normalny	zły
Rury betonowe	0,012	0,013	0,015	0,016
Nitowane oraz stalowe spiralne rury	0,013	0,015	0,017	—
Powierzchnia z czystego cementu	0,010	0,011	0,012	0,013
Wyprawa rozczynem z cementu	0,011	0,012	0,013	0,015
Mur z cegły na zaprawie cementowej	0,012	0,013	0,015	0,017
Kanały betonowe, licówka	0,012	0,014	0,016	0,018
Licówka z kamienia ciosanego	0,013	0,014	0,015	0,017
Zwykły mur z nieobrobionego kamienia na cementowej zaprawie	0,017	0,020	0,025	0,030
Zwykły suchy mur	0,025	0,030	0,035	0,040
Drewniane łotoki				
Z desek heblowanych	0,010	0,012	0,013	0,014
Z desek nieheblowanych	0,011	0,013	0,014	0,015
Z desek z nabitemi listwami 50 m/m × 4 m/m	0,012	0,015	0,016	—
Metalowe łotoki				
O przekroju półkolistym czystym	0,011	0,012	0,013	0,015
Kanały i łożyska w gruncie naturalnym				
Kanały ziemne o kształcie prawidłowym	0,017	0,020	0,0225	0,025
Kanały z powolnym przepływem	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Kanały ziemne, wyrobione kopaczką	0,025	0,0275	0,030	0,035
Kanały w loessie, czyste, o kształcie prawidłowym	0,017	0,020	0,0225	0,025
Kanały w loessie zanieczyszczone i zarośnięte	—	0,027	0,030	0,035
Kanały w żwirze z piaskiem	0.020	0,025	0,027	0,030
Kanały w ryniakach (otoczakach)	0,025	0,027	0,030	0,033
Mur z habjonów Palwisa	—	0,030	0,035	—
Kanały wykute w skale, o prawidłowych przekrojach	0,025	0,030	0,033	0,035
Kanały z dnem ziemnem, skarpy z muru kamiennego	0,028	0,030	0,033	0,035
Kanały z dnem kamienistem oraz ze skarpami ziemnemi, zarośniętemi	0,025	0,030	0,035	0,040
Kanały surowe wykute w skale, o przekroju nieprawidłowym	0,035	0,040	0,045	—
Koryta rzek naturalnych				
Czyste, proste łożysko bez odsypisk oraz wybojów	0,025	0,0275	0,030	0,033
Czyste, proste łożysko, lecz z kamieniami i lekko zarośnięte	0,030	0,033	0,035	0,040
Czyste, serpentynujące łożysko z niewielką ilością wybojów i mielizn *(A)*	0,033	0,035	0,040	0,045
Łożysko jak wyżej *(A)*, lecz lekko zarośnięte oraz z kamieniami	0,035	0,040	0,045	0,050
Łożysko jak *(A)*, lecz w dolnych odcinkach z mniejszym spadkiem	0,040	0,045	0,050	0,055
Łożysko jak *(A)*, lecz z odcinkami kamienistemi	0,045	0,050	0,055	0,060
Odcinki rzek z bardzo słabym prądem wody, wyraźnie zarośnięte oraz z bardzo głębokiemi wybojami	0,050	0,060	0,070	0,080
Odcinki rzek bardzo zarośnięte	0,075	0,100	0,125	0,150

lub Manning'a, pozostają w dalszym użytku. W latach ostatnich hydrologowie amerykańscy oraz rosyjscy zaproponowali pewne modyfikacje w wartościach współczynnika n dla powyższych wzorów.

W tabl. III podaję wartości n, oparte na pracach przeważnie Horton'a [11]), zaś w tabl. IV wartości proponowane przez inż. Sribnego [12]).

Tabl. IV jest specjalnie ciekawa, ponieważ zawiera wskazówki dla obszarów zalewowych.

Po ustaleniu przepływu wysokich wód o pożądanym prawdopodobieństwie oraz obraniu współczynników szorstkości tak dla głównego koryta, jak też dla terenów zalewowych, mamy często potrzebę wyznaczyć na pewnym odcinku rzeki, na przykład między wałami, rzędne zwierciadła wysokiej wody. Jeśli łożysko nie jest regularne, wtedy dla stałego przepływu Q ruch wody będzie nierównomierny, lecz ustalony, dla którego można napisać:

$$\Delta h = \left(\frac{Q}{C}\right)^2 \frac{P}{F^3} \Delta l + \frac{\alpha Q^2}{2g}\left(\frac{1}{F_d^2} - \frac{1}{F_g^2}\right) \quad . . (13)$$

$$\text{lub } \Delta h = \left(\frac{Q}{CF}\right)^2 \frac{1}{R} \Delta l + \alpha \left(\frac{V_d^2}{2g} - \frac{V_g^2}{2g}\right) \quad . . (14)$$

$$\text{lub } \Delta h = \frac{i_1 + i_2}{2} \Delta l + \alpha \left(\frac{V_d^2}{2g} - \frac{V_g^2}{2g}\right) \quad . . (15)$$

gdzie Δh — absolutny spad w metrach między sąsiednimi przekrojami,
Q — wyznaczony w sposób wyżej opisany przepływ w m³/s.
Fd — powierzchnia przekroju dolnego w m²
Fg — powierzchnia sąsiedniego przekroju górnego,
Vd — średnia szybkość w przekroju dolnym w m/s,
Vg — średnia szybkość w przekroju górnym w m/s,
F — powierzchnia przekroju średniego dla badanego odcinka
P — obwód zwilżony przekroju F.
R — promień hydrauliczny $= \frac{F}{P}$
Δl — odległość między profilami w m.

[11]) Horton. Sam better Kutters Formula Coefficient Eng. News-Record 1916/II.

[12]) Inż. Rżanicyn. Riecznaja gidrawlika cz. I. 1934. str. 70—73.

α — współczynnik $= 1{,}1$,
i_1 — spadek zwierciadła wody w profilu dolnym,
i_2 — spadek zwierciadła wody w profilu górnym.

Jeśli przekrój poprzeczny rzeki nie jest zwarty, a więc, składa się z głównego koryta oraz terenów zalewowych, wtedy przed rozpoczęciem obliczeń należy ustalić wartość współczynników szorstkości; dla głównego koryta n_1 i dla terenu zalewowego n_2 ewentualnie n_2 i n_3. Dalej zaś postępujemy w taki sposób: W pierwszym z dołu profilu przyjmujemy ruch równomierny, spadek zaś i_1 — bezpośrednio zaniwelowany lub średni wyrównany. (Pewny błąd w przyjęciu pierwszego spadku nie ma praktycznego znaczenia). Obliczamy napełnienie koryta dla przepływu danego Q_{max}, a więc rzędną zwierciadła wody w pierwszym profilu tj. Z_d; następnie przez próbę ustalamy rzędną zwierciadła wody w profilu drugim Z_g i dla tej rzędnej obliczamy F_g, P_g i R_g; ażeby sprawdzić teraz, czy przyjęta rzędna Z_g jest słuszna, należy wyznaczyć podział przepływu Q_{max} między korytem głównym a terenem zalewowym oraz spadek i_2 w profilu drugim. Odnalezienie wspomnianych wartości dokonywuje się zwykle w drodze szeregu uciążliwych prób, które zabierają dużo czasu. W celu ułatwienia tych czynności proponuję sposób następujący: Przyjmujemy znów, że w profilu górnym odbywa się ruch równomierny, dla którego można napisać, korzystając ze wzoru Manning'a:

a) dla koryta głównego przy współczynniku szorstkości n_1

$$Q_1 = \frac{1}{n_1} R_1^{2/3} F_1 I_1^{1/2} \text{ lub} = M_1 I_1^{1/2}\,{}^{1)} \qquad \ldots (16)$$

b) dla części obszaru zalewowego ze współczynnikiem n_2

$$Q_2 = \frac{1}{n_2} R_2^{2/3} F_2 I_2^{1/2} \text{ lub } M_2 I_2^{1/2} \qquad \ldots (17)$$

c) dla innej części obszaru zalewowego ze współczynnikiem n_3.

$$Q_3 = \frac{1}{n_3} R_3^{2/3} F_3 I_3^{1/2} \text{ lub } M_3 I_3^{1/2} \qquad \ldots (18)$$

przyjmujemy zwykle $I_1 = I_2 = I_3 = I$

Więc, $Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_{max} = (M_1 + M_2 + M_3) I^{1/2}$

$$\text{Skąd } I^{1/2} = i_2^{1/2} = \frac{Q_{max}}{M_1 + M_2 + M_3} = N \qquad \ldots (19)$$

$$i_2 = N^2;\ i_2^{1/2} = N \qquad \ldots (20)$$

Jeżeli teren zalewowy ma charakter jednakowy, wtedy $n_2 = n_3$

$$Q_1 + Q_2 = Q_{max} = (M_1 + M_2) I^{1/2}$$

TABL. IV

wartości współczynników szorstkości n i γ dla naturalnych łożysk oraz dla obszarów zalewowych.

Charakter łożyska	współczynnik Ganguillet Kutter'a n	szorstkości Bazin'a γ
Naturalne ziemne koryta w wyjątkowo dobrych warunkach, zupełnie czyste, proste, ze swobodnym przepływem)	0,025	1,25
Koryta rzek typu nizinnego, stale prowadzące wodę, szczególnie koryta wielkich i średnich rzek o dobrych warunkach przepływu wody i dobrym stanie łożyska	0,033	2,00
Dość czyste koryta rzek nizinnych, prowadzących stale wodę w normalnych warunkach, serpentynujących, z zaburzeniami w kierunkach strug, lub prostych, jednak z zaburzeniami w ukształtowaniu się dna (mielizny, wyboje, miejscami kamienie). Koryta ziemne ścieków, prowadzących wodę okresowo (wysychające, parowe) w dobrych warunkach	0,040	2,75
Koryta wielkich i średnich rzek, średnio zanieczyszczone, serpentynujące, częściowo zarośnięte, kamieniste, z niespokojnym przepływem wody. Okresowe (burzowe i wiosenne) ścieki, które niosą w czasie powodzi widoczną ilość namułów, z łożyskiem w ryniakach (otoczakach) lub zarośniętem. Obszary zalewowe wielkich i średnich rzek, średnio wyrobione, pokryte normalną ilością roślinności (trawy, krzaki)	0,050	3,75
Koryta okresowo czynnych ścieków, bardzo zanieczyszczone oraz serpentynujące: Obszary zalewowe, wyraźnie zarośnięte, nierówne, źle wyrobione (wyboje, krzaki, drzewa, łachy); Odcinki rzek nizinnych z szypotami; Koryta górskiego typu z otaczakami i głazami	0,067	5,50
Rzeki oraz obszary zalewowe bardzo zarośnięte (z powolnym przepływem wody), z dużemi, głębokiemi wybojami; Koryta górskiego typu z otoczakami o burzliwym spienionym ruchu wody; (woda tryska do góry)	0,080	7,00
Obszary zalewowe. Jak wyżej, lecz z bardzo nieregularnemi ukośnemi kierunkami strug, z łachami i t. p.; Koryta górskiego typu z wodospadami, wężowate, o łożysku z wielkich głazów; wyraźne progi; pienistość tak duża, że woda traci przezroczystość i ma kolor biały; szum potoku zagłusza inne dźwięki i przeszkadza rozmowie	0,100	9,00
Rzeki typu bagiennego (zarośle, kępy, w wielu miejscach woda prawie stojąca i t. p.); Obszary zalewowe pokryte lasem, z dużemi obszarami wody stojącej, z miejscowemi jeziorami i t. p.	0,133	12,00
Potoki, unoszące same rumowisko; Obszary zalewowe, zupełnie zarośnięte gęstym lasem . .	0,200	20,00
Pochyłości dorzecz w stanie naturalnym		$\gamma = 4$—1.

[1]) Zamiast promienia hydraulicznego R można brać dla szerokich przekrojów rzecznych średnią głębokość $t = \frac{F}{B}$.

$$I^{1/2} = i_2^{1/2} = \frac{Q_{max}}{M_1 + M_2} = N$$

Po wyznaczeniu $i_2^{1/2}$ obliczamy:

$$Q_1 = M_1\, i_2^{1/2};\quad Q_2 = M_2\, i_2^{1/2},$$

ewentualnie $Q_3 = M_3\, i_2^{1/2}$;

następnie $V_1 = \frac{Q_1}{F_1},\ V_2 = \frac{Q_2}{F_2},\ V_3 = \frac{Q_3}{F_3}$ [1]

$$\Delta h = \frac{i_1 + i_2}{2}\,\Delta l + \alpha\,\frac{V_\delta^2 - V_g^2}{2g}$$

Jeżeli Δh nie będzie równe przyjętej różnicy rzędnych $Z_g - Z_d$, wtedy należy rzędną Z_g odpowiednio zmienić, obliczenia zaś powtórzyć.

Dokonane obliczenia należy przedstawić w tabeli, jak to podano niżej dla przykładu.

Wartości dla przekroju np. Nr. 6 otrzymano z następujących obliczeń:

$$Q_1 = \frac{1}{0{,}025}\, 255 \times 3{,}65^{2/3}\, I^{1/2} = 24160\, I^{1/2};$$

$$Q_2 = \frac{1}{0{,}040}\, 801 \times 1{,}86^{2/3} = 30250\, I^{1/2};$$

$$Q_1 + Q_2 = 1186 = 54410\, I^{1/2};\quad I^{1/2} = 0{,}0218;$$

$$I = 0{,}000475 = 0{,}475\text{‰};\quad Q_1 = 24160 \times 0{,}0218 = 527;$$

$$Q_2 = 30250 \times 0{,}0218 = 659;$$

$$V_1 = \frac{Q_1}{F_1} = \frac{527}{255} = 2{,}07\ \text{m/s};\quad V_2 = \frac{659}{801} = 0{,}82\ \text{m/sek};$$

reszta danych tabeli nie potrzebuje wyjaśnień.

Przedłożony wyżej sposób ustalenia spadku i_2 oraz rozdzielania przepływów między korytem głównym a obszarem zalewonym daje w ogóle dobre wyniki we wszystkich wypadkach, gdzie zmiana powierzchni przekrojów odbywa się bez nagłych zmian.

Obliczenie Q_1, Q_2 i Q_3 wzorami 16, 17 i 18 nie przedstawia żadnych trudności i może być dokonywane za pomocą linii logarytmicznej.

Przy projektowaniu rozstawy oraz podwyższenia korony wałów należałoby zastanowić się jeszcze nad dwoma kwestiami, które mają, przynajmniej w pewnych wypadkach, doniosłe znaczenie, a mianowicie: a) nad podwyższeniem zwierciadła wodv w rzece na skutek zatoru lodowego i b) nad zamuleniem łożysk rzecznych między wałami.

Zatory lodowe mogą w pewnych warunkach podnieść poziom wody w rzece nawet wyżej katastrofalnych, które zdarzają się bez zatoru. Jeśli warunki przejścia lodów pozostają i nadal bez zasadniczych zmian, wtedy podwyższenie zwierciadła wody, wywołane przez zator, należy brać pod uwagę, obliczyć cofkę na skutek zatoru oraz przyjąć za miarodajny ten poziom wody, kóry okaże się wyższym.

Zamulenie łożyska rzek obwałowanych można obserwować na wielu rzekach. Pomiary przekrojów na Wiśle, Rabie, Wisłoku i Dunajcu, dokonane przez urzędy wojewódzkie w 1935 i 1936 r., wykazały, że na poszczególnych odcinkach tych rzek zaszły w ciągu dziesiątków lat po obwałowaniu dość poważne zmiany, jednak suma zmian dodatnich i ujemnych, t. j. zamuleń oraz pogłębień nie jest zbyt duża i wyraża się w liczbach następujących: na Wiśle, od km 103 do km 247 nastąpiło na ogół zamulenie, które wyniosło przeciętnie 5,3 m/m w ciągu roku na całej szerokości między wałami; na Rabie nastąpiło zamulenie do 3,4 m/m w ciągu roku na całej szerokości; na Wisłoku około 5 m/m. Powyższe dane wypośrodkowano za okres czasu od 21 do 52 lat. Z tego wynikałoby, że zamulenie między wałami odbywa się, chociaż i dość powolnie; średnie podwyższenie łożyska i terenu zalewowego w ciągu roku można przyjąć 4—5 mm na całej szerokości między wałami. W ciągu 100 lat podwyższenie całego koryta między wałami może osiągnąć 0.40 — 0.50 m, które to podwyższenie należałoby brać pod uwagę, przynajmniej na obszarach zalewowych.

Część przekroju	Przekrój F m²	B m	t m	Q m³/sek	V m/s	$\frac{\alpha V^2}{2g}$ m	i ‰	$\frac{i_1+i_2}{2}$ ‰	Δl m	$\frac{i_1+i_2}{2}\cdot\Delta l$ m	$\Delta\alpha\frac{v^2}{2g}$	h	H	Wartość n
Odcinek rzeki Warty od .... do .... Q max = 1186 m³/sek.														
Przekrój Nr. 5.														
f_1	304	69	4,41	445	1,46	0,121	0,170	—	—	—	—	—	94,47	
f_2	1261	531	2,37	741	0,60	—	—	—	—	—	—		—	$n_1 = 0{,}025$
Przekrój Nr. 6, przyjęto rzędną 94,65														$n_2 = 0{,}040$
f_1	255	70	3,65	527	2,07	0,240	0,475	0,322	960	0,309	−0,119	0,19	94,66	
f_2	801	430	1,86	659	0,82	—	—	—	—	—	—	—	—	
Przekrój Nr. 7, przyjęto rzędna 95,00														
f_1	222	61	3,64	447	2,00	0,224	0,449	0,461	730	0,336	+0,016	0,352	95,01	
f_2	877	439	2,00	739	0,83	—	—	—	—	—	—	—	—	

[1] Z powyższego też wynika: $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{M_1}{M_2} = M;\quad Q_2 + Q_1 = Q;\quad Q_2 = \frac{Q}{1+M};\quad Q_1 = Q - Q_2.$

Wartości rzędnych $\Phi = \frac{K-1}{C_v}$ według Foste'ra

przy $C_v = 1$

Współczynnik asymetrii C_s	Prawdopodobieństwo pojawienia się wraz z wyższymi w procentach 0,1	1,0	3,0	5	10	20	25	30	40	50	60	70	75	80	90	95	97	99,0	99,9	Współczynnik asymetrii C_s
0,0	+3,00	+2,33	+1,87	+1,64	+1,28	+0,84	+0,68	+0,52	+0,25	0,00	—0,25	—0,52	—0,68	—0,84	—1,28	—1,64	—1,88	—2,32	—3,09	0,0
0,2	3,38	2,48	1,93	1,69	1,30	0,83	0,67	0,51	0,22	—0,03	—0,28	—0,55	—0,70	—0,85	—1,25	—1,58	—1,79	—2,18	—2,81	0,2
0,4	3,67	2,62	2,00	1,74	1,32	0,82	0,65	0,48	0,19	—0,06	—0,31	—0,57	—0,71	—0,85	—1,22	—1,51	—1,69	—2,03	—2,54	0,4
0,6	3,95	2,77	2,06	1,79	1,33	0,80	0,62	0,45	0,15	—0,09	—0,34	—0,58	—0,72	—0,86	—1,19	—1,45	—1,59	—1,88	—2,28	0,6
0,8	4,25	2,30	2,12	1,83	1,34	0,78	0,60	0,42	0,12	—0,13	—0,37	—0,60	—0,73	—0,86	—1,16	—1,38	—1,49	—1,74	—2,03	0,8
1,0	4,54	3,03	2,19	1,87	1,34	0,76	0,57	0,38	0,08	—0,16	—0,40	—0,61	—0,73	—0,86	—1,12	—1,31	—1,39	—1,50	—1,80	1,0
1,2	4,82	3,15	2,25	1,90	1,35	0,74	0,54	0,35	0,05	—0,19	—0,42	—0,62	—0,73	—0,85	—1,08	—1,25	—1,30	—1,45	—1,59	1,2
1,4	5,11	3,28	2,31	1,93	1,34	0,71	0,51	0,32	+0,02	—0,22	—0,44	—0,63	—0,73	—0,84	—1,05	—1,18	—1,21	—1,32	—1,40	1,4
1,6	5,39	3,40	2,36	1,96	1,33	0,68	0,48	0,28	—0,01	—0,25	—0,46	—0,64	—0,73	—0,82	—1,00	—1,11	—1,13	—1,19	—1,24	1,6
1,8	5,66	3,50	2,41	1,98	1,32	0,64	0,44	0,24	—0,05	—0,28	—0,48	—0,64	—0,72	—0,80	—0,95	—1,03	—1,06	—1,08	—1,11	1,8
2,0	5,91	3,60	2,46	2,00	1,30	0,61	0,41	0,20	—0,08	—0,30	—0,49	—0,64	—0,71	—0,78	—0,90	—0,95	—0,98	—0,99	—1,00	2,0
2,2	6,20	3,70	2,48	2,01	1,28	0,58	0,37	0,17	—0,11	—0,33	—0,49	—0,63	—0,69	—0,75	—0,85	—0,90	—0,90	—0,90	—0,91	2,2
2,4	6,47	3,78	2,49	2,01	1,25	0,54	0,33	0,13	—0,14	—0,35	—0,50	—0,62	—0,66	—0,71	—0,79	—0,82	—0,82	—0,83	—0,83	2,4
2,6	6,73	3,87	2,50	2,01	1,23	0,51	0,32	0,10	—0,17	—0,37	—0,50	—0,60	—0,64	—0,68	—0,74	—0,76	—0,76	—0,77	—0,77	2,6
2,8	6,99	3,95	2,51	2,02	1,20	0,47	0,26	+0,06	—0,20	—0,38	—0,50	—0,59	—0,62	—0,65	—0,70	—0,71	—0,71	—0,71	—0,71	2,8
3,0	+7,25	+4,02	+2,52	+2,02	+1,18	+0,42	+0,25	—0,03	—0,23	—0,40	—0,50	—0,57	—0,60	—0,62	—0,65	—0,66	—0,66	—0,67	—0,67	3,0

Odbitka z czasopisma „Gospodarka Wodna", Nr. 4, 5, 1936 r.
6734 Drukarnia Gospodarcza, Warszawa, Al. Jerozolimskie 79. Tel. 8-84-12, 8-28-02.